

Estado de la Implementación de Arquitectura de Red para LWSN

Egas Acosta Carlos
 DETRI
 Escuela Politécnica Nacional
 Quito- Ecuador
 carlos.egas@epn.edu.ec

Herrera Carlos
 DETRI
 Escuela Politécnica Nacional
 Quito- Ecuador
 carlos.herrera@epn.edu.ec

Resumen—Las aplicaciones del Internet las Cosas, han crecido de manera acelerada. El desarrollo de aplicaciones en redes a gran escala que requiere que el nodo opere con baterías por largos períodos de tiempo, es un reto en la actualidad. Las limitaciones asociadas a la capacidad de procesamiento y consumo de energía de los nodos influyen en la implementación de protocolos que aseguren la transmisión rápida, confiable y segura de datos. Se presenta el estado de desarrollo de la arquitectura de red para redes inalámbricas de sensores a gran escala con topología lineal. Se presenta las características de la topología lineal para definir que procesos de una arquitectura de red son realmente necesarios. Se propone la utilización de protocolos ya existentes para la implementación de la arquitectura, algunos de los cuales deben ser modificados o adaptados con nuevas funciones para alcanzar el objetivo propuesto. Por último, se indica las actividades realizadas, algunos desafíos y las futuras direcciones de investigación en este campo.

Keywords— LWSN, arquitectura, MQTT-SN.

I. INTRODUCCIÓN

El creciente número de aplicaciones en el Internet de las Cosas (IoT) está relacionado con tecnologías que satisfagan la necesidad de menores costos operativos, facilidad para la administración de la red y que permitan la implementación de nuevas aplicaciones. Sin embargo, cuando se requiere tener nodos portátiles que operen con baterías por largos períodos de tiempo, se necesita tener nodos de bajo consumo de energía, lo que influye en sus capacidades de cálculo. Este tipo de nodos forman parte de las Redes Inalámbricas de Sensores (WSN)

En redes WSN multisalto a gran escala, el retardo por procesamiento en los nodos influye de manera importante en el retardo de extremo a extremo. Por otra parte, todos los protocolos convencionales usados en la red Internet no pueden ser implementados en este tipo de nodos por su baja capacidad de cálculo.

No existe una definición ampliamente aceptada para IoT ni un consenso sobre una arquitectura IoT, diferentes arquitecturas se han presentado tratando de abordar los aspectos de IoT desde diferentes perspectivas [1]. De la misma manera las WSN ampliamente utilizadas en las implementaciones de sistemas IoT, utilizan varias arquitecturas red [2] como se indica en la Figura 1.

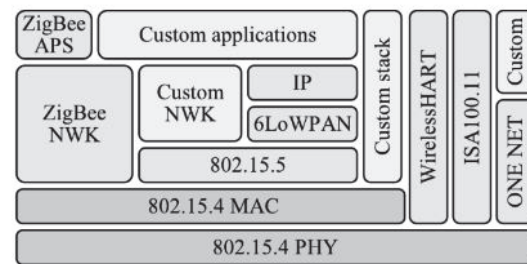


Figura 1. Arquitecturas de red para WSN

Todas estas arquitecturas para WSN presentan problemas relacionadas con el retardo, cuando se utilizan para implementar Redes Inalámbricas de Sensores con Topología Lineal (LWSN) a gran escala, debido a la poca capacidad de cálculo de los nodos o porque no fueron diseñadas para funcionar redes multisalto.

Debido a que diversas aplicaciones como el sensado de tuberías, fronteras, túneles, carreteras, etc. requieren topologías lineales multisalto, se propone la creación de una nueva arquitectura para WSN que permita la implementación de redes para estas aplicaciones. La arquitectura propuesta utiliza protocolos que se están utilizando en la actualidad y en otros casos se agregan nuevas funciones a los protocolos existentes.

Las principales contribuciones de la nueva arquitectura propuesta para facilitar la implementación de sistemas IoT pueden resumirse en:

- Definición de una arquitectura de red compuesta de capa de física, capa de enlace, capa de transporte y capa de aplicación para minimizar el retardo por procesamiento del nodo.
- Facilita la implementación de aplicaciones IoT relacionadas con topologías lineales multisalto a gran escala.

El documento está organizado de la siguiente manera.

La Sección II, se define las características de LWSN y se propone una nueva arquitectura en la Sección III. La Sección IV presenta el estado actual de la implementación de la arquitectura y algunas direcciones futuras de investigación. Finalmente, se concluye el artículo en la Sección V.

II. CARACTERÍSTICAS DE LWSN

En la red LWSN, Figura 2, los nodos sensores deben enviar la información del sentido o de alarma a un colector de datos, a través de los nodos frontera de la topología lineal. Por las características del protocolo de enlace IEEE 802.15.4 el cual permite un alcance máximo de 60 metros en condiciones ideales, si la infraestructura lineal es de decenas de kilómetros, es necesario la presencia de nodos retransmisores de datos para que los datos lleguen a los nodos frontera y por consecuencia al colector de datos[3].

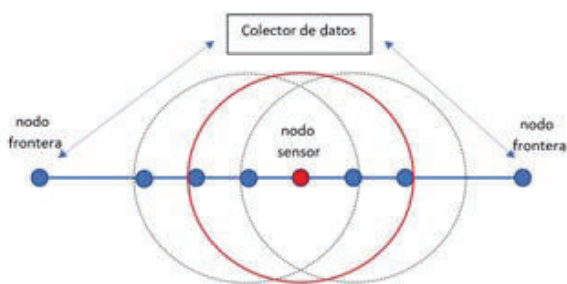


Figura 2. Topología lineal multisalto

Este tipo de redes tienen las siguientes características:

- Existe una sola ruta para llegar a cualquiera de los nodos frontera.
- La ruta es conocida por cada nodo.
- Los nodos sensores disponen de una única interface inalámbrica.
- Dentro de la zona de cobertura de cada nodo existen pocos nodos.
- Los nodos tienen baja capacidad de computación, y la existencia de un único hilo de programación, impide que se tenga varias aplicaciones funcionando simultáneamente,
- La transmisión confiable de los datos utilizando ACK a nivel de enlace genera altos retardos.
- Varios nodos pueden sentir el mismo evento.

III. ARQUITECTURA PROPUESTA

Para definir la nueva arquitectura propuesta es necesario identificar los procesos innecesarios de la capa de red y transporte en una topología lineal.

A. Nivel de red

El nivel de red de la arquitectura Internet se diseña para realizar conmutación y enrutamiento con el propósito de tener una conectividad de extremo a extremo proporcionando calidad de servicio. A continuación se analiza las funciones principales de la red con topología lineal[4].

Direccionamiento. Debido a la posición fija de los nodos en la infraestructura lineal, los identificadores de los nodos pueden ser asignados de manera secuencial, lo que permite identificar su posición dentro de la red. Un nodo sabe que enviando una trama por su interface utilizando la dirección a nivel de enlace la trama seguirá la única ruta para llegar al

nodo frontera. No hay necesidad de tener una dirección de red, todos los nodos pertenecen a la misma red.

Conmutación de paquetes. Los nodos en una topología lineal solo poseen una interface inalámbrica, con una transmisión dúplex, no se requiere realizar conmutación, la interface por la cual llegan los paquetes es la misma por donde se reenvían.

Servicios proporcionados a la capa de transporte. El nivel de red entrega los paquetes a la capa de transporte a un sola aplicación, esto implica tener un único flujo de datos. De esta manera la capa de red no requiere proporcionar y administrar varios tipos de servicios para diferentes aplicaciones.

Servicios con conexión y desconexión. En este tipo de redes no es aplicable el concepto de datagramas debido a que existe una única ruta, no es posible tener circuitos virtuales a nivel de red, debido a la baja capacidad de cálculo de los nodos y porque los nodos no pueden ejecutar dos aplicaciones de manera simultánea.

Algoritmos de enrutamiento. La función principal de la capa de red es el enrutamiento, sin embargo, en una topología lineal hay una sola ruta, por lo tanto, no es necesaria la ejecución de algoritmos de enrutamiento. Los algoritmos actuales fueron diseñados para redes en donde existe varias rutas para que los paquetes lleguen a su destino. La selección de una nueva ruta se da por los cambios de topología debida a un enlace o nodo caído, estos eventos también ocurren en una LWSN, por lo que para tener conectividad de extremo a extremo es necesario solucionar este inconveniente.

Algoritmos de congestión. Debido a la naturaleza de las aplicaciones de monitoreo y alarma, el flujo de datos depende de periodicidad del monitoreo. Por otra parte, la baja probabilidad en la generación de alarmas no requiere que en los nodos se implementen algoritmos que controlen la congestión de tráfico.

Calidad de servicio. Los nodos sensores ejecutan una sola aplicación, por lo tanto, en una LWSN se transmiten datos que pertenecen a la misma aplicación, la red es utilizada por una única aplicación, por lo que no se requiere implementar algoritmos complejos para proporcionar calidad de servicio para varias aplicaciones.

Tunelización. Por la baja capacidad de cálculo de los nodos y por las características de la red, no se puede ni es necesario implementar procesos de tunelización.

Fragmentación de paquetes. Los mensajes son de monitoreo y alarma, por lo tanto, son de longitud pequeña y no es necesario fragmentar los paquetes. La utilización de procesos de reensamblado de paquetes no es necesario.

B. Nivel de Transporte

Con relación a la capa de transporte se identifican los siguientes procesos.

Mejorar la confiabilidad. La confiabilidad del transporte de datos utiliza confirmaciones de recepción ACK entre el nodo fuente y nodo destino, para lo cual es necesario detectar la pérdida de paquetes.

Control de congestión. Considerando que el tráfico en una LWSN utilizada para aplicaciones de monitoreo, las probabilidades de congestión es mínima.

Con estos antecedentes, la gran mayoría de las funciones de la capa de red y transporte no son necesarias, por lo tanto, pueden ser eliminadas de la arquitectura de red. Las funciones que si son necesarias se las implementa en la capa de enlace. De esta manera la arquitectura de red propuesta consta de cuatro capas utilizando únicamente los protocolos IEEE 802.15.4 y MQTT-SN [5]. La arquitectura es la siguiente:

APLICACIÓN	USUARIO
TRANSPORTE	MQTT-SN
ENLACE	IEEE 802.15.4
FISICO	IEEE 802.15.4

Figura 3. Arquitectura propuesta

C. Protocolo IEEE 802.15.4

La propuesta de la nueva arquitectura para una LWSN implica que la capa de enlace es la responsable de realizar funciones de la capa de transporte y de red en un LWSN. Estas funciones son las siguientes

- Conectividad de extremo a extremo.
- Confiabilidad para lo cual se utiliza eACK o iACK
- Identificación de los nodos en la red.
- Encriptación de los datos.
- Recuperación ante cambios de topología.

D. Protocolo MQTT-SN

El protocolo Message Queue Telemetry Transport (MQTT) [6] es un protocolo de la capa de aplicación. MQTT está diseñado para transportar mensajes entre dispositivos de recursos limitados. Esta arquitectura se basa en el concepto de publicación-suscripción. MQTT es implementado en dispositivos que son principalmente controlados por puertas de enlace a un back-end, servidor empresarial centralizados estos servidores, que a su vez analizan y almacenan los datos recuperados utilizando una plataforma IoT existente.

El protocolo MQTT-SN es un protocolo de mensajería de publicación/suscripción para redes de sensores inalámbricos (WSN), creado con el objetivo de extender el protocolo MQTT más allá del alcance de la infraestructura TCP/IP para soluciones de sensores y actuadores.

En la arquitectura propuesta, el protocolo MQTT-SN debe trabajar como protocolo de transporte y sus mensajes deben encapsularse directamente en el protocolo 802.15.4

IV. ESTADO ACTUAL DE IMPLEMENTACIÓN

Se está trabajando en la implementación de la arquitectura con dos objetivos principales

- Añadir las funciones del nivel de red y transporte en el protocolo IEEE 802.15.4.
- Implementar el protocolo MQTT-SN para encapsular sus mensajes en el protocolo IEEE 802.15.4

A. Implementar funciones en el Protocolo IEEE 802.15.4

Se ha implementado y validado algoritmos a nivel de enlace con el protocolo IEEE 802.15.4. La validación de los algoritmos ha sido realizada en prototipos reales. El prototipo implementado para validar los algoritmos utilizan nodos RCB 256RFR2 [7], Figura 4 estos nodos permiten manipular directamente el protocolo IEEE 802.15.4, el lenguaje de programación utilizado es C y la herramienta de desarrollo es ATMEL Studio [8].



Figura 4. Nodo RCB 256RFR2

Estas herramientas permiten implementar programas que modifican directamente la cabecera y la carga de datos del protocolo y configurar las características de operación.

Hasta la presente se han probado y validado algoritmos en capa de enlace que realizan las funciones requeridas cuyos resultados que han sido publicados [9][10][11], funciones que se mencionan a continuación.

- Asignación automática de identificadores de manera secuencial, lo cual permite la ubicación del nodo dentro de la infraestructura lineal, sin la utilización de GPS e identificar a los nodos dentro de la red.
- Recuperación de la conectividad extremo a extremo cuando uno o varios nodos fallan.
- Recuperación de enlaces caídos y ruidosos
- Confirmación de recepción de tramas utilizando iACK que permite tener una confiabilidad de extremo a extremo.
- Corrección de errores ocasionados por enlaces ruidosos mediante la retransmisión de tramas utilizando iACK, si bien el protocolo IEEE 802.15.4 permite opcionalmente la utilización de eACK, la utilización de iACK optimiza el consumo de energía y los retardos
- Eliminación de tramas repetidas transmitidas cuando varios nodos sensores detectan un evento simultáneamente.
- Selección de dirección de flujo de transmisión de datos a uno de los dos nodos frontera.

Para la validación de los algoritmos en el prototipo implementado, los nodos se configuraron en el modo de operación no ranurado, en el cual los nodos operan con CSMA/CA, en este escenario los nodos deben estar siempre activos, lo que afecta al consumo de batería y por lo tanto al tiempo de vida de los nodos. Considerando que las acciones

de monitoreo implican la definición de períodos en los cuales el nodo debe estar activo y momentos en los cuales el nodo puede estar en estado dormido, se implementó un algoritmo que permite que los nodos que forman parte de topología lineal, estén activos en un intervalo de tiempo para transmitir datos de sensado y estén en estado dormido en otro intervalo para únicamente sensar, lo que permite optimizar el consumo de energía[12].

Si bien el protocolo 802.15.4 fue diseñado para operar en modo ranurado, cuando dentro de la zona de cobertura del nodo existen miles de nodos, en el caso de LWSN, esta opción no es óptima debido a que dentro de la zona de cobertura de cada nodo se tiene pocos nodos.

Se considera que el primer objetivo de añadir funciones al nivel de enlace se ha realizado con éxito.

B. Implementar el Protocolo MQTT-SN para operar sobre capa de Enlace

Una vez comprobado que el protocolo IEEE 802.15.4 puede realizar las funciones del nivel de red y transporte que se requieren en una LWSN, el siguiente objetivo es implementar el protocolo MQTT-SN para que opere directamente sobre la capa de enlace.

Para lograr este objetivo es necesario encapsular los mensajes MQTT-SN en las tramas IEEE 802.15.4.

Hasta el momento se han realizado las siguientes acciones:

Desarrollo de la máquina de estados finitos del protocolo MQTT-SN para su operación sobre IEEE 802.15.4 en topologías lineales [13].

Implementación los formatos de los mensajes MQTT-SN en nodos RCB 256RFR2 y la transmisión de dichos mensajes, encapsulándolos en tramas 802.15.4 y su procesamiento en el nodo receptor.

Falta por realizar:

- La codificación del diagrama de estados finitos del protocolo MQTT-SN en los nodos y las pruebas para operar con un broker MQTT a MQTT-SN.
- Diseño de una antena bidireccional que opere en la banda de los 2.4 Ghz con un diagrama de radiación que considere nodos que están ubicados en una línea recta con diferentes medios de propagación de la señal, específicamente cuando los nodos forman parte de una tubería para aplicaciones de monitoreo.

Paralelamente, se está trabajando en aplicar la arquitectura propuesta, reutilizando todos los algoritmos, con el protocolo LoRa, y de esta manera utilizar las ventajas de LoRaWAN en el desarrollo de aplicaciones para IoT.

V. CONCLUSIONES

El desarrollo de la nueva arquitectura es viable y facilita la creación de nuevas aplicaciones para LWSN. Se ha comprobado de manera real, que los retardos en una transmisión de extremo a extremo disminuyen con la aplicación de la nueva arquitectura, se mantiene la confiabilidad de la red cuando fallos en los nodos y enlaces, y

la recuperación de las tramas perdidas eliminando el nivel de red y transporte.

Por último, la implementación de la encapsulación de mensajes en el protocolo IEEE 802.15.4 es factible y falta por comprobar el funcionamiento del protocolo MQTT-SN implementado en redes MQTT.

AGRADECIMIENTOS

Esta propuesta es posible realizarla gracias a los siguientes proyectos realizados y en ejecución aprobados por la EPN. PIS 14-06, PIS 15-02, PII 17-07, PIS-17-03, PII 2021-01, PIS 22-09 y PIIF 22-02, y a la colaboración de los estudiantes del DETRI con sus tesis de grado y trabajos de integración curricular

REFERENCIAS

- [1] T. Domínguez-Bolaño, O. Campos, V. Barral, C. J. Escudero, and J. A. García-Naya, "An overview of IoT architectures, technologies, and existing open-source projects," *Internet of Things (Netherlands)*, vol. 20, 2022. doi: 10.1016/j.iot.2022.100626.
- [2] A. A. Kumar S., K. Ovsthus, and L. M. Kristensen, "An industrial perspective on wireless sensor networks-a survey of requirements, protocols, and challenges," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1391–1412, 2014, doi: 10.1109/SURV.2014.012114.00058.
- [3] C. Egas and F. Gil-Castineira, "Revisión de requisitos, protocolos y desafíos en LWSN," *MASKAY*, vol. 11, no. 1, 2020, doi: 10.24133/maskay.v11i1.1728.
- [4] C. Egas Acosta, F. Gil-Castineira, and E. Costa-Montenegro, "Red inalámbrica de sensores con topología lineal sin capa de red," *Rev. Investig. en Tecnol. la Inf.*, vol. 9, no. 17, 2021, doi: 10.36825/riti.09.17.006.
- [5] A. Stanford-Clark and H. L. Truong, "MQTT for sensor networks (MQTT-SN) protocol specification," *OASIS Draft*, 2013.
- [6] MQTT, "MQTT Specifications," 2022. <https://mqtt.org/mqtt-specification/>
- [7] A. Atmel®, "ATmega 256RFR2 DataSheet," 2014. [Online]. Available: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-8393-MCU_Wireless-ATmega256RFR2-ATmega128RFR2-ATmega64RFR2_Datasheet.pdf
- [8] Microchip, "Microchip Studio for AVR® and SAM Devices," 2020.
- [9] A. C. Egas, F. Gil-Castineira, E. Costa-Montenegro, and J. S. Silva, "Automatic allocation of identifiers in linear wireless sensor networks using link-level processes," in *2016 8th IEEE Latin-American Conference on Communications, LATINCOM 2016*, 2016. doi: 10.1109/LATINCOM.2016.7811574.
- [10] C. E. Acosta, F. Gil-Castineira, E. Costa-Montenegro, and J. S. Silva, "Reliable link level routing algorithm in pipeline monitoring using implicit acknowledgements," *Sensors (Switzerland)*, vol. 21, no. 3, 2021, doi: 10.3390/s21030968.
- [11] C. E. Acosta, F. Gil-Castineira, and C. E. Gualotuna, "Optimization of delays and power consumption in large-scale linear networks using iACK," in *2020 IEEE ANDESCON, ANDESCON 2020*, 2020. doi: 10.1109/ANDESCON50619.2020.9272063.
- [12] L. Vera and C. Egas Acosta, "Algoritmo para el monitoreo de estructuras lineales a gran escala," *RTE*, vol. 34, no. 3, pp. 58–71, 2022, doi: <https://doi.org/10.37815/rte.v34n3.951>.
- [13] C. Panchi and C. Egas Acosta, "Diagramas de estados para la conversión del protocolo MQTT-SN a MQTT utilizando UML," *RTE*, vol. 34, no. 2, pp. 84–99, 2022, doi: <https://doi.org/10.37815/rte.v34n3.953>.